

SPAC法の一般化とCCA法の開発について On the generalization of the SPAC method and the development of a CCA method

長 郁夫^{1*}
CHO, Ikuo^{1*}

¹産総研

¹National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

はじめに

微動アレイ探査法は常時微動のアレイ観測で得られるレーリー波位相速度の分散データに基づく地下構造推定法である。いわゆる表面波探査のように人工振源を必要とせず、数m程度のごく浅部から数kmまでの大深度に至るまで手軽に探査できる。位相速度の解析法には大別して Spatial Autocorrelation Method (SPAC法) [Aki, 1957] と FK法 [Capon, 1969] がある。FK法では任意形状のアレイが利用されるが、SPAC法は標準的には「円形アレイ」に限定される [Okada, 2003]。しかし地震計数や解析可能波長帯域を考慮した総合的な解析効率では FK法よりも優れる [Okada, 2003]。さらに SPAC法には本来2点アレイを適用できる可能性があり [Aki, 1957]、この10年間にそれが再評価されてきた。例えば、Chavez-Garcia et al. [2005] や Extrom et al. [2009] は、長時間データを利用すれば2点 SPAC法を適用可能なことを実証している。このような背景により、近年は SPAC法のほうが良く使われるだけでなく、適用性の理論検討や様々な拡張がなされている。

SPAC法の一般化とCCA法の開発

著者らの場合、Henstridge[1979]に基づいて Akiの SPAC法の理論を一般化した [Cho et al., 2006]。すなわち定常確率過程論に基づいて3成分円形アレイの解析法を一般的に記述した。この理論は、レーリー波の位相速度や楕円率、レーリー波とラブ波のパワー比等を効果的に抽出するための解析手法を生み出すための基礎となった。ラブ波の位相速度をレーリー波と完全に分離して抽出する方法を生み出すための基礎となった。2点 SPAC法(2点干渉法)の適用条件や最適な観測時間を厳密に理論検討するための基礎となった。

Centerless Circular Array (CCA)法は、この一般理論に基づくレーリー波位相速度解析ツールの1つである。不規則に配置した3個の地震計で構成されるアレイへの適用性を最大の特徴とする。また、長波長の解析性能に優れるという特徴もある。解析性能を低下させるファクターとしての SN比の評価法やノイズの補正法も検討している。

本発表の前半では微動アレイ探査の概略に触れた上で、以上の経緯を述べる。

浅部探査のための極小アレイ解析の開発

後半は、CCA法を基礎とする「極小アレイ解析」について報告する。極小アレイ解析とは、ごく小さいアレイ(半径1m以下)を用いた10~15分程度の微動観測で地表から数10m、時として100mを超える深さに対応する分散データを取得するための方法である。解析結果の品質管理のための指標も得られる。この1年は、極小アレイ解析の実用化のために次の課題に取り組んだ。すなわち、(i) 微動強度が低い場合十分な SN比が得られず目的深度に対応する長波長を解析できないケースがあるが、一般に解析結果の品質が悪く信頼性が疑わしい場合にどう対応すれば良いか? (ii) 速度構造推定は一般に非一意であり、その対応として先験情報が必要となる。しかし変化に富む浅部ではごく近接地点の情報が必要となるので結局はデータがない場合が多い。諸々の情報を補間して先見的なモデルを作るのは相当骨が折れる作業であり、微動探査の「簡易性」というメリットが損なわれる。地下構造推定まで含めた探査効率の追求のためにはどうすれば良いか?

極小アレイの観測例を増やしつつこの問題の対処策を検討した結果、(i)については、補足的に小半径(半径数m~10m程度)の3点不規則アレイを追加すればそれほど観測効率を下げずに対処できることが分かってきた。(ii)については、分散曲線に簡単な変換式を適用して S波速度の深度分布に変換する昔ながらの Simple Profiling Method (SPM) [e. g., Heukelom and Foster, 1960] で客観的なイメージを得、引き続き簡単な処理— H/V 深度変換 [長他, 2013] および Simplified Inversion Method (SIM) [Pelekis and Athanasopoulos, 2011] — で分解能を向上することにより、かなりの効果を上げられることが分かった。

上記の解析プロセスを自動化できれば、微動探査の最大のメリット「いつでもどこでもデータを取得可能」に「誰でも、大量でも解析可能」が加わり、微動探査分野でも「ビッグデータ」に対応できるようになる。現在、データ解析区間の自動判別に加え、精度向上の余地はあるが分散データおよび H/V 深度変換の自動読み取りアルゴリズムの開発が終了したところである(長他, 本大会; 先名他, 本大会)。こうして得られた極小アレイ解析で S波速度2次元断面を半自動で描き出す解析ツールは、公開中の解析ソフト BIDO (<https://staff.aist.go.jp/ikuo-chou/bidodl.html>) の拡張版として公開する予定である。

謝辞 前半の成果の多くは多田卓博士、篠崎祐三教授との共同研究で得られた。後半の成果の多くは先名重樹博士および防災科学技術研究所および微動の会有志の方々との共同研究で得られた。

SSS35-01

会場:502

時間:5月2日 14:15-14:35

キーワード: 微動, 速度構造, 表面波, 位相速度, 探査, アレイ

Keywords: Microtremor, velocity structure, surface waves, phase velocity, exploration method, array

微動アレー観測による Rayleigh 波と Love 波の検出 Detection of Rayleigh wave and Love wave detection from microtremor array measurements

大堀 道広^{1*}; チタク セチキン²; 久保 篤規³; 大石 佑輔³; 高橋 宏和³; 山品 匡史³
OHORI, Michihiro^{1*}; CITAK, Seckin²; KUBO, Atsuki³; OISHI, Yusuke³; TAKAHASHI, Hirokazu³; YAMASHINA, Tadashi³

¹ 福井大学附属国際原子力工学研究所, ² 海洋研究開発機構地震津波・防災研究プロジェクト, ³ 高知大学理学部
¹University of Fukui, ²Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ³Kochi University

地震動予測に必要な S 波速度構造の探査法として、微動アレー観測はもっとも実用的な方法の一つである。すでに多くの研究事例 [例えば堀家 (1985)] に見られるように、S 波速度構造の推定には、多くの研究事例では主に上下動成分が利用されており、これより検出される Rayleigh 波の分散性が用いられている。これに対して、水平成分より Love 波を検出する試みは非常に少ない [例えば山本 (2000)]。これには、微動の水平成分には Love 波と Rayleigh 波の両方が含まれており、これらを分離するのが難しいことも一因と考えられる。

微動アレー観測記録の代表的な解析法として、FK 法 [Capon(1969)] と SPAC 法 [Aki(1957)] があげられる。いずれの手法も Rayleigh 波の検出に用いられるが、FK 法は斎藤 (2007) により、SPAC 法は岡田・松島 (1990) や山本 (2000) により、それぞれ拡張され、Love 波の検出も可能になっている。これらの手法の適用性は、今後、多くの場所で確認される必要がある。著者らの既往の研究 [大堀ほか (2013)] では、高知市の高須地区において 2010 年 11 月に微動アレー観測を実施し、FK 法により Rayleigh 波と Love 波の検出に成功している。この時、8 台の地震計を用いて、半径 50m および 100m の円形アレーを同時観測し、FK 法により 1.2~3.8Hz の範囲の Rayleigh 波と Love 波を検出している。

対象地点における微動の伝播特性の理解を深め、より高い周波数 (約 6Hz) までの位相速度を得るために、著者らは 2013 年 3 月に同じ場所で 4 台の地震計を用いて、半径 50m, 25m, 12.5m の微動アレー観測を順次実施したので報告する。位相速度の推定には、上下動成分に対しては Capon(1969) の方法を、水平成分については斎藤 (2007) の方法を、それぞれ用いている。さらに、SPAC 法 [山本 (2000)] による位相速度の算出を行い、FK 法による結果との比較も行っている。なお、SPAC 法より得られた微動の水平成分における Love 波のエネルギー比率は、1.4~6Hz にかけて概ね 40~70% の範囲に分布しており、既往の研究事例と調和的な結果が得られている。

本研究にあたり、機動式地震計を快くご貸与頂いた防災科学技術研究所藤原広行氏、先名重樹氏に感謝申し上げます。本研究の一部は科学研究費補助基金・基盤研究 (C) 課題番号 24540464 (研究代表者: 大堀道広)、おなじく基盤研究 (C) 課題番号 25420479 (研究代表者: 小嶋啓介) の支援を受けたことを記します。

キーワード: 微動アレー観測, FK 法, SPAC 法, Rayleigh 波, Love 波

Keywords: microtremor array measurements, FK spectral method, SPAC method, Rayleigh-wave, Love-wave

三成分アレイを用いた微動の構成成分の推定：遠野アレイにおける結果 Estimating composition of ambient noise from three-component records at Tono array

高木 涼太^{1*}; 中原 恒²; 河野 俊夫¹; 岡田 知己¹
TAKAGI, Ryota^{1*}; NAKAHARA, Hisashi²; KONO, Toshio¹; OKADA, Tomomi¹

¹ 東北大・理・予知セ, ² 東北大・理・地球物理

¹RCPEV, Graduate School of Sci., Tohoku Univ., ²Geophysics, Graduate School of Sci., Tohoku Univ.

Ambient noise methods have become common tools to explore and monitor subsurface structure. However, effective uses of ambient noise should stand on the knowledge of a nature of ambient noise. In order to reveal the composition of ambient noise quantitatively, we extend the SPAC method to body wave incidence. Applying the extended SPAC method to the observation at Tono array, northeast Japan, we shows a good agreement between the theoretical cross spectra and the observed cross spectra. By fitting the theoretical cross spectra to the observed cross spectra, we estimated the composition ratio of Rayleigh, Love, and P waves. The characteristics of the composition ratio show a significant change at 1 Hz. While the P wave composition in total power is 5-15% and the lowest one below 1 Hz, the P wave composition suddenly increases above 1 Hz and reaches 50% and the highest one in those of the three wave modes. The change at 1 Hz is attributed to attenuation of high-frequency surface waves because the decay rate of the absolute value of power spectra of surface waves gets steeper around 1 Hz as compared with the constant decay of P wave. We also examine the temporal variation of the composition of ambient noise. Whereas power spectrum of each mode shows long-term and short-term temporal variations coincident with offshore significant wave height, the ratio between power spectra varies little with time. The constant composition ratio suggests that the mechanism and the source-receiver distance are stable in time. Accordingly, near coastal region is a possible region of the dominant source of the observed ambient noise. For applications of ambient noise, we should take account of the composition of ambient noise.

キーワード: 常時微動, SPAC, 三成分アレイ観測

Keywords: ambient noise, SPAC, three-component array observation

Toward Earthquake Ground Motion Prediction using the Onshore-Offshore Ambient Seismic Field in Subduction Zones Toward Earthquake Ground Motion Prediction using the Onshore-Offshore Ambient Seismic Field in Subduction Zones

VIENS, Loic^{1*} ; MIYAKE, Hiroe¹ ; KOKETSU, Kazuki¹
VIENS, Loic^{1*} ; MIYAKE, Hiroe¹ ; KOKETSU, Kazuki¹

¹Earthquake Research Institute, University of Tokyo

¹Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Ground motion prediction is critical to evaluate the seismic hazard specially in high seismicity areas as Japan. A source of particular concern is the complex geological structures as sedimentary basins which can trap and amplify seismic waves. It has been proved by Prieto and Beroza (2008) that reliable phase and amplitude of the impulse response functions can be extracted by deconvolution of the ambient seismic field recorded by two on-land stations without any pre-processing. This approach has the great advantage to predict accurate ground motion of moderate earthquakes at periods longer than 4 s without the need of any external information about the velocity structure. However, this method allows only to recover relative, rather than absolute, amplitudes. To retrieve the corresponding Green's functions, impulse response amplitudes need to be calibrated using records of an earthquake which happened close to the "virtual" source. Moreover, as surface-to-surface Green's functions are extracted, some mismatches are observed between Green's functions and the earthquake records. This feature is due to the fact that depth and focal mechanism of the event are not taken into account. Despite of these disadvantages, accuracy of the predicted ground motion is high and such long-period ground motion investigation is critical to carried out seismic hazard assessment for high-rise buildings, bridges, or oil tank having long-period resonance. In this study, we use this technique in subduction zones to extract vertical-to-vertical component of the Green's functions between seismic stations located on the ocean bottom and on-land Hi-net stations. The target region is located in the Tokai/Tonankai areas where two submarine cable-based sea-bottom seismographic observation systems have been deployed by the Japan Meteorological Agency (JMA). We use one month of noisy data recorded in January 2013 to compute the Green's functions. The choice of these data is motivated by a strong signal-to-noise ratio of the causal part of the Green's functions during this period. We validate this approach by comparing computed Green's functions with offshore moderate earthquake ($M_w \sim 5$) records in the Nobi sedimentary basin where the Nagoya city is located. As megathrust earthquakes are expected in this area, we extrapolate our results to predict magnitude $M_w \sim 6$ or larger earthquake ground motions using the scaling law of seismic spectrum developed by Aki (1967). These results are finally compared to long-period ground motion prediction equations to evaluate their validity.

キーワード: Ground motion Prediction, Ambient seismic field, Subduction zones, Low frequency, Deconvolution
Keywords: Ground motion Prediction, Ambient seismic field, Subduction zones, Low frequency, Deconvolution

微動単点測定による地盤構造推定に関するレビューとその適用例 Review of study on microtremors and application for subsurface structure modeling

鈴木 晴彦^{1*}
SUZUKI, Haruhiko^{1*}

¹ 応用地質
¹ OYO

微動の研究は、金井の一連の研究 (Kanai et al., 1954) に端を発し、微動 (短周期) の卓越周期や振幅スペクトルと地盤構造の関連性が議論された。その後、卓越周期が必ずしも地下構造と対応しない場合があるため、スペクトル比の利用が考案された。2 地点間の微動のスペクトル比を取り、基準点に対するスペクトル比を求め、微動源と伝播経路の影響を取り除く試みが行われた。微動のスペクトル比と地震動のスペクトル比の対応などについての研究が行われている (例えば、瀬尾・佐間野、1993)。

さらに、1980 年代になると微動の水平動成分と上下動成分のスペクトル比を推定し、地盤構造の推定が行われるようになった。Arai and Tokimatsu (2005) は、微動を表面波の基本モードだけでなく高次モードの重ね合わせであるとして、表面波の高次モードを考慮した理論 H/V スペクトル比を示し、逆解析による S 波速度構造の推定が行われるようになった。これは、微動の短周期成分の振幅が明瞭な日変化を示して (山中ほか、1991) いること、長周期成分の振幅が波浪や低気圧により生成 (鏡味ほか、1983) されることより、微動の振動源は主に地表に存在すると考えられ、Arai and Tokimatsu (2005) の仮定を支持している。一方、中村 (1988) では、基本的に微動の H/V スペクトル比は SH 波の重複反射による増幅特性を示しているとしている。地盤の 1 次固有周波数付近では SH 波の重複反射による増幅特性を示し、1 次固有振動数の 2 倍付近の周波数帯域は、Rayleigh 波によって乱された特性を示している (中村、2008)。時松・田村 (1995) による、地表面鉛直加振の数値シミュレーションでは、1 次固有周波数付近は、振源の十分遠方でも実体波が卓越するとしており、微動の H/V スペクトル比は地盤の 1 次固有周期付近では実体波の水平動と上下動の比を示している可能性がある。Sanchez-Sesma et al. (2010) では、拡散波動場を仮定した表面波および実体波を考慮した理論 H/V スペクトル比が提案されている。

微動の H/V スペクトル比は、地震災害危険度評価の一環としてサイスミックマイクロゾーニングに活用されている。若松ほか (1998) では、大阪平野を対象として実施した短周期微動観測から、微動の H/V スペクトル比に基づく大阪平野のサイスミックマイクロゾーニングを行っている。また、Senna et al. (2013) では、短周期帯域の微動 H/V スペクトル比に加え、小規模微動アレイデータ、地震動の長周期帯域のラディアル成分と上下動成分のスペクトル比のデータを用いて、地下数 m から数 km までの浅部深部統合地下構造モデルの構築が行われ、強震動計算のモデルとして活用されている。

参考文献:

Arai and Tokimatsu (2005): Bull. Seism. Soc. Am., 95, 1766-1778.; Kanai et al. (1954): Bull. Earthq. Res. Inst., 32, 199-209.; 鏡味ほか (1983): 地震 2, 36, 609-618.; 中村 (2008): 物理探査学会第 3 回地震防災シンポジウム予稿集; 瀬尾・佐間野 (1993): 文部省科学研究総合研究 (A) 研究成果報告, 198-200.; Senna et al. (2013): Journal Disaster Research, 889-901.; 時松・田村 (1995): 日本建築学会構造系論文集, 493, 49-55.; 山中ほか (1991): 1991 年度春季地震学会講演予稿集, No.1, 107.; 若松ほか (1998): 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, 1077-1082.

キーワード: 微動, スペクトル比, S 波速度構造モデル
Keywords: Microtremors, Spectral ratio, S-wave structural modeling

液状化地域の「i 微動」的解釈：浦安地域におけるケーススタディ（2） Geological Interpretation of a Liquefied Area by 'i-Bido': A Case Study in Urayasu City, Japan (2)

佐藤 伸司^{1*}; 東 将士²; 樋口 茂生³; 稲田 晃³; 伊藤 彰秀⁴; 岩本 広志⁵; 上加 世田 聡⁶; 川崎 健一⁷; 楠 恵子⁸; 品田 正一²; 末永 和幸⁹; 渡邊 拓美³; 先名 重樹¹⁰; 藤原 広行¹⁰
SATO, Shinji^{1*}; HIGASHI, Masashi²; HIGUCHI, Shigeo³; INADA, Akira³; ITO, Akihito⁴; IWAMOTO, Hiroshi⁵; KAMIKASEDA, Satoshi⁶; KAWASAKI, Kenichi⁷; KUSUNOKI, Keiko⁸; SHINADA, Shoichi²; SUENAGA, Kazuyuki⁹; WATANABE, Takumi³; SENNA, Shigeki¹⁰; FUJIWARA, Hiroyuki¹⁰

¹ 千城台高校, ² 石油資源開発, ³ 無, ⁴ 千葉北高校, ⁵ 関東天然瓦斯開発, ⁶ NTC コンサルタンツ (株), ⁷ 千葉西高校, ⁸ 浦安高校, ⁹ (株) 地球システム科学, ¹⁰ 防災科学技術研究所

¹ Chishirodai high school, ² JAPEX, ³ No affiliation, ⁴ Chiba-kita High school, ⁵ Kanto Natural Gas Development Co., Ltd, ⁶ NTC Consultants Co., Ltd., ⁷ Chiba-nishi High school, ⁸ Urayasu high school, ⁹ Earth System Science Co., Ltd., ¹⁰ NIED

2011.3.11 東北地方太平洋沖地震で浦安高校に2本の長大地割れ(①, ②)が発生した。この地域は、埋立プロセスから《A》海面下土地、《B》海底浚渫土砂による埋立地《C》護岸周辺地帯という3地区に分類可能で、前述の地割れ①は《A》地区と《B》地区の境界に、②地割れは《B》地区と《C》地区の境界に発生したと考えられる(岩本ほか, 2014)。

これらのことを踏まえ、地下地質の物性の把握とこれまでの線的な把握を面的に拡張することを目的として、《A》《B》《C》の3地区に沖積地を加えた4地区で常時微動観測を行った。具体的には、微動観測の後、得られたH/Vスペクトルと地下地質との比較および解析を行った。常時微動観測では防災科学技術研究所のJU310微動計を用い、その計測、解析には同研究所の「i 微動」システム(先名ほか, 2011)を用いた。

この結果、明らかになったのは次のとおりである。(1)《A》《B》《C》全ての地区で1Hz強にピークが認められる。これは洪積層と沖積層のインピーダンス比によるピークと考えられ、沖積地および埋立地に共通する。(2)《B》地区(第1期埋立地)では、4-5Hz前後にピークが認められ、典型的な埋立地の特徴を示す。ボーリング調査の結果を踏まえると、《B》地区に特徴的に分布する(Nd値0の海底浚渫土砂による)埋立地シルト層と沖積層とのインピーダンス比が関係している点が重要である。(3)《A》《C》地区では、4-5Hz前後のピークは見られないか、不明瞭である場合が多く、このピークを生じる両者のコントラストは認められない。ただ《C》では、護岸周辺のNd値の高い物質の関与が推定される。一方、①および②地割れを挟む両側では、たった数メートルの距離でも、この4-5Hz前後のピークが一方では認められ、他方では認められない。

以上から、「i 微動」による解析結果は、岩本ほか(2014)による埋立層の地質単元区分が地割れ生成史を解く上で不可欠な点を、物理的な側面から裏づけた。このように、常時微動観測は、ボーリング結果との併用により地下地質の物性把握と面的な拡張に非常に有用である。今後防災分野への利用に向けた積極的な展開を考えたい。

謝辞 中山俊雄氏(NIED客員研究員)には、i 微動システムの利用にあたって大変お世話になった。ここに感謝申し上げる。

文献

岩本広志, 東将士, 樋口茂生, 稲田晃, 伊藤彰秀, 上加世田聡, 川崎健一, 楠恵子, 佐藤伸司, 品田正一, 末永和幸, 渡邊拓美(2014) 液状化地域の現世地質学的解釈：浦安地域におけるケーススタディ(1)。地球惑星科学連合2014年大会。

先名重樹, 東宏樹, 武留井優子, 藤原広行(2011) 微動探査観測システム「i 微動」等の開発。物理探査学会第124回学術講演会論文集, 346-348。

キーワード: 液状化, 地割れ, 常時微動, i 微動, 浦安, 埋立地

Keywords: liquefaction, crack, micro tremor, i-Bido, Urayasu, reclaimed land

SSS35-06

会場:502

時間:5月2日 16:15-16:30

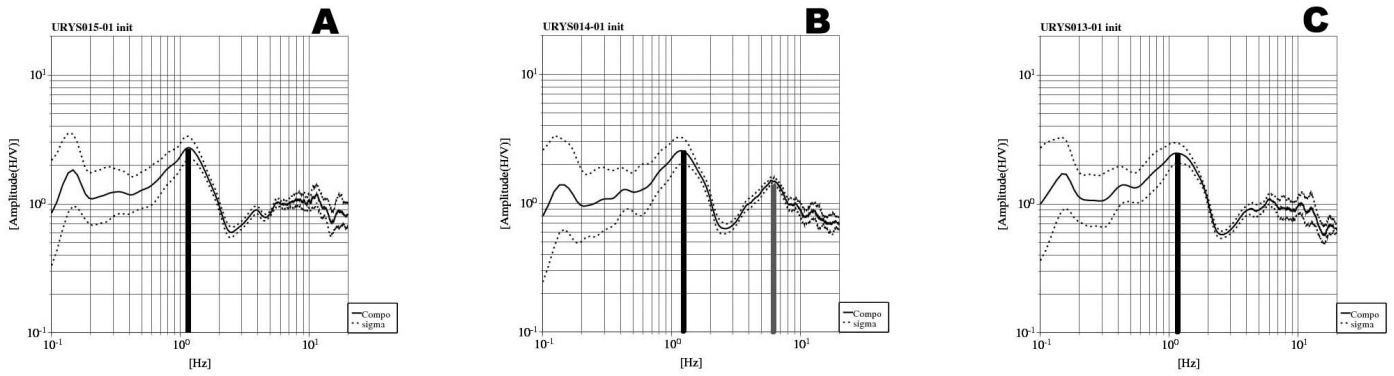


図1 A, B, C各地域におけるH/Vスペクトル

地震動と微動のH/Vスペクトル比の違いと拡散場動場に基づく理論的解釈 H/V Spectral Ratios for Both Microtremors and Earthquake Motions and Interpretation based the Diffuse Field Theory

川瀬 博^{1*}; 松島 信一¹
KAWASE, Hiroshi^{1*}; MATSUSHIMA, Shinichi¹

¹ 京都大学防災研究所
¹ DPRI, Kyoto University

微動データのH/Vスペクトル比(HVR)は簡便であることから、多方面で数多く利用され、その適用性検討の過程で地震動データのHVRも最近多く解析されている。一方、地震記録においては、古くから遠地記録の軸方向Radial成分と上下動の比(RVR)が地殻構造を反映しているものとして活用され、今日ではレシーバー関数法として一次元的地殻構造のP-SV波場のレスポンスと対応させることにより、標準的に地殻構造逆算に用いられている。しかしながら、その短周期域については同様に評価手法が確立され活用されているとは言い難い状況にある。

微動HVRを用いて地盤構造を推定する手法ではこれまで水平成層構造におけるレーリー波の励起として解釈されることが多く、その性質を利用して上下動成分を用いたアレー微動解析でレーリー波の位相速度と対応付けられてきた。一方実体波が主体の地震動HVRにおいては水平成層構造への斜め入射のP-SV波場でモデル化できるはずだが、実際には微動HVRとほぼ類似のスペクトル形状となることが多く、それは盆地生成表面波のためと解釈されてきた。浅部地盤のインピーダンス比が大きい場合、HVRのピーク振動数と表層S波増幅のピーク振動数、および表面波のピーク振動数が対応することはよく知られており、これまで理論と観測とのスペクトル形状の一般的不一致から、微動および地震動のHVRの利用においてはその適用限界を弁えるべきものと解釈されてきた。

しかし最近、拡散理論に基づき、HVRは上下加振グリーン関数の虚部に対する水平加振グリーン関数の虚部の比になることを明らかにした。この解釈では微動の場合は点加振解に、地震動の場合は平面波入射の解でそれぞれ水平方向と上下方向に応答を求めればよい。

本稿ではこれまで観測してきた地震動のS波部分および同一地点の微動に対して水平上下スペクトル比を求め、それを系統的に比較するとともに、拡散波動場理論に基づく解釈を適用し、推定地下構造の理論予測値と比較した結果を報告する。

結論からいうと、一般的性状として微動は一次のピークがあってその直後に谷となったあと、高振動数域でのピークも谷も明瞭ではなくなるが、地震動の場合には高振動数域にも明瞭なピークや谷が存在し、それは深部地盤速度構造の影響を反映したものであること、地震動で最適化した構造が必ずしも微動に対しても最適なスペクトル比を生成できるとは限らず、同時インバージョンの有効性が示唆されることを明らかにしている。

キーワード: 微動, 地震動, 拡散波動場
Keywords: microtremors, strong motion, diffuse-field theory

盆地端部形状が微動の水平上下スペクトル比に与える影響 The Effect of the Basin Edge to the Directional Dependent Horizontal-to-Vertical Spectral Ratios of Microtremors

松島 信一^{1*}; デ マルタン フロロン²; 川瀬 博¹; 福岡 侑里³; サンチェス-セスマ フランシスコ⁴
MATSUSHIMA, Shinichi^{1*}; DE MARTIN, Florent²; KAWASE, Hiroshi¹; FUKUOKA, Yuri³; SANCHEZ-SESMA, Francisco⁴

¹ 京都大学防災研究所, ² フランス地質調査所, ³ 京都大学工学部, ⁴ メキシコ国立自治大学工学研究所
¹DPRI, Kyoto University, ²Risk and Prevention Division, BRGM, ³School of Engineering, Kyoto University, ⁴Institute of Engineering, UNAM

著者らは京都大学宇治キャンパス内で常時微動観測を行い、水平上下 (H/V) スペクトル比解析で慣例的に行われているように水平 2 成分の平均をとらず NS/UD と EW/UD とを別々に求めたところ、ピーク振幅は NS/UD の方が大きく、ピーク振動数は EW/UD の方が高いという方位依存性があること示した。また、微動の H/V スペクトル比は、理論的には拡散波動場においてある一点を加振点及び受振点とする上下加振に対する上下応答のグリーン関数の虚部に対する水平加振に対する水平応答グリーン関数の虚部の比の平方根であることが明らかにされている (Sanchez-Sesma et al., 2011)。この理論は微動の H/V スペクトル比は水平成層構造を仮定する必要がないのが大きな特徴である。著者らは、観測記録の分析から、観測記録に見られる方位依存性が基盤の不整形性から起因していること示す一方で、数値計算により微動の H/V スペクトル比を計算し、基盤の不整形性が H/V スペクトル比に与える影響について検討した (Matsushima et al., 2014)。

京都大学宇治キャンパス周辺では、P 波反射法地震探査等の地下構造調査が行われており、東側に黄檗断層があり、そこから西に向かって基盤が傾斜して深くなっていることが示されている。本研究では、これらの情報をもとに基盤の不整形性が二次元的な構造をしており、約 1km の距離の間で基盤深さが二次元的に 420m 深くなる基盤構造であると仮定したモデルを用いた。

この二次元地盤構造モデルを用いて、三次元スペクトルエレメント法 (SEM) (De Martin, 2011) により、対象点における上下加振に対する上下応答のグリーン関数の虚部に対する水平加振に対する水平応答グリーン関数の虚部の比を、二次元構造に直交する方向 (EW 成分) と並行する成分 (NS 成分) について計算を行ったところ、NS/UD は EW/UD よりピーク振幅が大きく、EW/UD は NS/UD よりピーク振動数が高いという観測記録に対応する結果が得られた。また、直下の構造を抽出して水平成層構造を仮定して計算した結果と比べるとピーク振幅が小さく、ピーク振動数が高く、二次元構造の影響が H/V スペクトル比に与える影響が大きかった。また、盆地端部の形状が H/V スペクトル比に与える影響について数値計算にて検討したところ、盆地端部の形状が微動の H/V スペクトル比に大きな影響を与えることがわかった。さらに、二次元構造に直交する形で 2 つの測線に沿って多点の微動観測をした結果、理論的に予想される観測結果が得られた。

このように、二次元的な基盤の不均質性に影響を受けた微動観測記録の H/V スペクトル比の方位依存性を SEM による数値計算にて定性的に再現し、不整形な基盤構造が微動の H/V スペクトル比に大きな影響を与えることを示した。このことは、微動の H/V スペクトル比を用いて基盤の不均質性を考慮した地下構造の推定を行うことが出来ることを示す一方で、水平成層構造を仮定した推定を行う際に注意を要することを表している。

キーワード: 微動, H/V スペクトル比, 拡散波動場, 不整形, 地下構造

Keywords: Microtremor, H/V Spectral Ratio, Diffuse Field, Heterogeneity, Velocity Structure

微動を用いた浅部構造探査法の高度化(その1):自動読み取りアルゴリズムの開発 Sophistication of microtremor methods to survey shallow structures, PartI: Development of automatic reading algorithms

長 郁夫^{1*}; 先名 重樹²; 藤原 広行²
CHO, Ikuo^{1*}; SENNA, Shigeki²; FUJIWARA, Hiroyuki²

¹産総研, ²防災科研

¹National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, ²National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

近年、我々は微動を用いた浅部構造探査法の潜在能力を最大限に発揮するための効果的な手順を検討してきた。観測の簡易化は、ポータブル微動計の開発(先名他, 2006, 2012)に加え、CCA法を用いた極小アレイ観測と3点不規則小アレイの適用(長他, 2013a)によりほぼ実用化されたと考えている。データ解析では位相速度の分散データに古典的な直接変換法(例えば、Heukelom and Foster, 1960)を適用すれば低分解能ながら簡便にS波速度構造のイメージが得られるので、我々は不連続構造を抽出するためのツールとしてH/Vスペクトルの深度変換(長他, 2013b)を提案し、その適用結果を位相速度と合わせて簡易逆解析法(Pelekis and Athanasopoulos, 2011)にかけることで分解能を向上できることを示した(先名他, 2013; 吉田他, 2013)。

現時点での課題は、データ解析の最初の段階すなわち位相速度の読み取りを目視で実施しているため、観測の簡易化で膨大なデータが得られるようになっても対処が困難となることである。読み取り結果の再現性や分析者の癖によるバイアスも問題となる。H/V深度変換のためのスペクトルの山谷の読み取りも目視なので同様の問題がある。そこで我々は、位相速度およびH/V深度変換を自動読み取りするために次のようなアルゴリズムを考えた。

・位相速度の自動読み取り

あるサイトにおいて複数のアレイ、複数の解析法(すなわち、nc-CCA法, CCA法, SPAC法)でそれぞれ位相速度の分散曲線が得られているとする。各分散曲線にそれぞれ次の処理を適用する。(1)周波数を対数刻みで等間隔な区間(BIN)に分け、BINごとに位相速度を算術平均する。(2)BINごとの平均データがアレイ半径に対する相対波長が手法ごとに決められた範囲を逸脱する場合および位相速度の解析結果が解析限界に近い場合(中心点付きのアレイを用いることで解析限界が計算可能となる)、それらのデータは以降の処理から除外する。隣合うBINの並びが原点を通る直線状となる場合も適切な解析結果が得られていないと判断してその区間はデータ処理から除外する。こうしてふるいにかけて得られたすべてのデータをBINごとに算術平均し、自動読み取り値とする。ただし再度データ開始部の直線的傾向をチェックし、直線的傾向が確認された場合、その区間を除外する。

・H/Vスペクトルの山谷の自動読み取り

同一サイトで得られたすべてのH/Vスペクトルを周波数ごとに算術平均し、周波数依存のウィンドウ幅を持つ窓関数で平滑化する。スペクトルの微係数が0となる点を低周波数側から順にサーチして山谷を同定する。その際、初めての山の出現後にサーチを開始し、必ず山と谷がペアになるように読み取ることにする。ロバスト化のために、隣り合う山と谷の周波数の差あるいはH/V値の比が閾値よりも小さい場合、高周波数側にある山と谷のペアは読み飛ばす仕様とする。また、ある山よりも次の山のH/V値のほうが小さい場合、あるいはある谷よりも次の谷のH/V値のほうが小さい場合も、次の山と谷のペアを読み飛ばす。こうして得られた山と谷のペアごとに、山に対応する深度と谷に対応する深度を平均してH/V深度変換の代表値とする。

ある測線に沿う微動アレイデータに上記のアルゴリズムを適用して2次元断面を描いたところ、目視で読み取った場合とそれほど違わない、概ね自然なS波速度断面が得られた(先名他, 2014(本大会))。読み取り精度にはまだ向上の余地があるものの、第一段階としては良好な結果である。本発表では実際の自動読み取りと目視読み取り結果の比較例を報告する。例えば図1はアレイ半径3.5mの3点不規則小アレイによるCCA法の分散曲線(紫線)とアレイ半径0.6mの極小アレイによるnc-CCA法, CCA法, SPAC法の分散曲線(それぞれ黄, 青, 緑線)が得られているサイトへの適用例である。自動読み取り結果(黄四角)は、異なる半径、異なる解析手法の分散曲線が互いに自然に接続し、目視(×印)による結果とほとんど相違がない。同図に示される細赤線は極小アレイによる位相速度の解析限界である。この解析限界は、それよりも位相速度が十分に低い周波数帯域では解析結果の信頼性が高いことを示す指標として自動読み取りに活用されている。

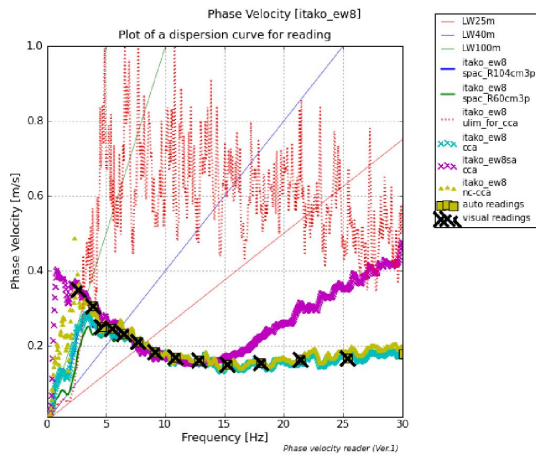
キーワード: 微動, 速度構造, 表面波, 位相速度, 探査, アレイ

Keywords: Microtremor, velocity structure, surface waves, phase velocity, expolation method, array

SSS35-P01

会場:3階ポスター会場

時間:5月2日 16:15-17:30



微動を用いた浅部構造探査の高度化 (その2): 自動読み取りアルゴリズムの適用 Sophistication of microtremor methods to survey shallow structures, Part2: Application of automatic reading algorithms

先名 重樹^{1*}; 長 郁夫²; 藤原 広行¹
SENNA, Shigeki^{1*}; CHO, Ikuo²; FUJIWARA, Hiroyuki¹

¹ 防災科学技術研究所, ² 産業総合技術研究所
¹NIED, ²AIST

1. はじめに

近年, 我々は微動を用いた浅部構造探査法について, 簡便で精度の高い手法を検討してきた. 観測の簡易化は, 微動システムの開発(先名他, 2006, 2012)や, CCA法を用いた極小アレイ観測等(長他, 2013a)で実用化した. 一方で, データ解析では, 位相速度をS波速度構造に直接変換する手法(Simple Profiling Method, SPM)(例えば, Heukelom and Foster, 1960)を適用した上で, 層構造を仮定するためのH/Vスペクトルの深度変換(長他, 2013b)を提案し, 簡易逆解析法(Simplified Inversion Method, SIM)(Pelekis and Athanasopoulos, 2011)を適用して分解能を向上できることを示してきた(先名他, 2013). さらに長他(2014, 本大会)は現時点での課題として膨大な量のデータへの対処を見据え, 分散曲線・H/Vスペクトルの自動読み取りアルゴリズムを提案した. 本報告では長他(2014)の自動読み取りアルゴリズムを実データに適用し, 目視による読み取り結果と比較して実用性を検討する.

2. 観測・解析手法について

観測・解析は, 下記の流れで実施している.

1) 極小アレイおよび不規則アレイでの観測

微動の観測時間は, アレイの形状(60cm 極小アレイおよび, 3m~10m の3点不規則アレイ)によらず15分間の連続観測としている.

2) 分散曲線とH/Vスペクトルの自動解析・読み取り

微動解析ソフトBIDOを用いてデータ解析区間を自動選択し, 自動解析を実行している. 分散曲線およびH/Vスペクトルのピーク・谷の読み取りは長他(2014)の提案アルゴリズムで自動処理している.

3) 1次元S波速度構造の推定と2次元断面の構築

波長Lと位相速度 V_r の関係で示される分散曲線を深さDとS波速度 V_s の関係で示される1次元S波速度構造に変換する(SPM). その際の変換式は $V_s = V_r / 0.92$, $D = 0.375L$ とする. この1次元速度構造を空間補間して2次元断面にする. この2次元断面に, H/V深度変換による不連続深度を重ね描きする. ここまでの処理はすべて自動処理で行われる. なお1節では解析の最後にSIMを実施すると述べたが, 現状ではロバスト性の問題でSIMの自動処理アルゴリズム開発には至っていない. そのため本研究ではSIMは扱わない.

3. 2次元断面結果

4つの異なる堆積環境の地域(潮来市・秦野市・柏市・浦安市)で得られた微動アレイデータに上記の手順を適用して2次元断面を描いたところ, 分散曲線の読み取りとH/Vスペクトルのピーク・谷の読み取りを目視で実施した場合とそれほど違わない, 概ね自然なS波速度断面が得られた. なお, ボーリングのN値分布や想定地質断面図, Senna et al.(2013)の地盤モデルともそれほど違わない結果となっている. . . . このように長他(2013)による自動読み取りアルゴリズムは, 位相速度等の読み取り精度にはまだ向上の余地があるものの, 比較的良好な結果が得られるものと考えられる. また, 本報告では, さらに地盤構造の地域特性や, 既往の地盤モデルとの比較を行い, 手法の精度の検証を行っている.

<謝辞>

秦野市の結果については, 神奈川大学荻本孝久教授等に微動観測について多大なご支援をいただいた. また, 柏市の結果については, 産業総合技術研究所の中澤努氏に多大なご協力をいただいた. ここに謝意を表します.

キーワード: 微動, 速度構造, 表面波, 位相速度, アレイ, 地下構造モデル

Keywords: Microtremor, velocity structure, surface waves, phase velocity, array, underground structure model

微動システムの開発と今後の展開 Future Initiatives of development of microtremor survey observation system

先名 重樹^{1*}; 藤原 広行¹
SENNA, Shigeki^{1*}; FUJIWARA, Hiroyuki¹

¹ 防災科学技術研究所
¹ NIED

1. はじめに

地震動予測地図の高度化のためには、高精度な地盤モデルの作成は必要不可欠であるが、そのためのボーリング調査や反射法地震波探査は、莫大にコストがかかる。一方で、近年、直接的な地震観測以外で地震時の揺れの周期特性や地盤の速度構造を良くとらえることのできる常時微動観測が行われてきている。常時微動観測は、地震動予測のための地盤構造モデル作成に非常に有用な物理探査手法である。その観測の手軽さにより、ここ 10 年で各大学・研究期間では非常に多くの研究がなされている。しかしながら、研究そのものはバラバラの機材・考え方により各大学の小さな研究素材としてとじられており、データの共有等についても、ボーリングデータ以上に集約が難しい情報となってしまう。そこで、筆者等は、微動計の管理・データベース登録等システム・教育システムをパッケージとして用意・提供し、機材・データの品質・情報管理を効率良く行っていく仕組みの構築を行っている。本報告では、これまでの取り組みと、現在実施している取り組みをまとめた報告を行う。

2. これまでの開発と展開

本研究の微動システム開発のコンセプトは、安定的（観測のばらつきが少ない）に大量のデータを取得することができる仕組みを作ることである。地面に置くだけで、短時間に高精度な微動観測を可能とし、専門家・技術者でなくても安定的に観測・データ登録・解析の一連の工程について、バラツキの少ない観測・解析結果が出せるシステムを構築するため、以下に示す 4 つの項目について検討してきた。

① 常時微動解析ソフト「Tremor data View」のバージョンアップと微動アレイ解析ツール「Microtremor Array Observation Tool(MAOTool)」の作成

② スマートフォンを利用した観測データおよび観測位置情報等のデータベースへの即時登録（スマートフォンアプリケーション「i 微動」の作成/微動データベースのバージョンアップ）

③ スマートフォン等に安定的にデータ転送できる通信システムを搭載した微動計の製作（JU-310 の製作）

④ 微動観測結果の即時解析による結果の閲覧および、J-SHIS 等との既存システムとの相互運用による、観測地点の震度・地盤情報等との比較・解析機能（クラウド型解析機能の構築）

なお、上記システムは現時点で常時稼働しており、複数の研究者に利用されている。

3. 今後の展開

筆者等の提案として、防災科研がデータセンターとしての機能を持ち、微動計の管理・データベース登録等システム・教育システムをパッケージとして用意・提供し、機材・データの品質・情報管理を効率良く行っていく開発を実施するため、現在、上記微動システムを地方大学・研究機関等の希望者に観測レクチャーおよび解析教育も提供してデータを共有しており、大きな成果を得られつつある。先々収集される微動観測や地盤情報の「ビッグデータ」の管理を効率化するため、現在の微動システムを再構築する必要が出てきており、今後も開発を続けていく予定である。

<謝辞>

防災科学技術研究所の内藤昌平氏、東宏樹氏および白山工業（株）の中井俊樹氏には、微動システムの開発の段階において、貴重なご意見をいただいた。ここに謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 先名重樹, 安達繁樹, 荒木恒彦, 飯澤清典, 藤原広行: 微動探査観測システムの開発, 第 115 回物理探査学会予稿集, pp.120-122, 2006.
- 2) 先名重樹, 大井昌弘, 藤原広行: 微動探査データの収集管理とデータベースシステムの構築, 地球惑星科学連合大会, S150-P010, 2007.
- 3) 先名重樹, 藤原広行: 微動探査観測ツールの開発その 1 - 常時微動解析ツール -, 防災科学技術研究所研究資料第 313 号, 2008.
- 4) 先名重樹, 東宏樹, 武留井優子, 藤原広行: 微動探査観測システム「i 微動」等の開発, 第 124 回物理探査学会予稿集, pp.82-84, 2011.

SSS35-P03

会場:3 階ポスター会場

時間:5 月 2 日 16:15-17:30

キーワード: 微動, 観測システム, クラウドシステム, ビックデータ
Keywords: microtremor, survey observation system, cloud system, big data

線形アレーを使ってレーリー波位相速度の推定 Estimation of phase velocity of Rayleigh wave using linear array

ZHANG XINRUI^{1*}; 盛川 仁¹
ZHANG, Xinrui^{1*}; MORIKAWA, Hitoshi¹

¹ 東京工業大学

¹Tokyo Institute of Technology

Since the spatial autocorrelation (SPAC) method has been proposed by Aki (1957), the observation using a circular array of evenly spaced sensors and a central sensor becomes a commonly used measurement technique in the microtremor survey method (Okada, 2003). However, in practice, the strict arrangement of sensors required by the method is difficult to conduct because of the limit of real environment. In order to slacken the requirement of the arrangement, Chavez-Garcia et al. (2005) discussed the validity of performing the SPAC method with a linear array. However, the conclusion of this research is result-based and is not backed by theoretical demonstration. Aki's autocorrelation coefficient could be alternatively seen as the azimuthal average of CCFs (Okada, 2003; Shiraishi 2006). A CCF consists of the Bessel function and an error term which varies with the azimuth of sources. By taking the azimuthal average, the error term vanishes and direct $J_0(kr)$ can be obtained. The discrete formula of the CCF offers the possibility of extending the original SPAC method. In this research, we develop the solution by controlling the error term in CCF which can obtain directly the phase velocity instead of using records of sensors in a line instead of azimuthally arranged ones.

Under the assumption: 1) Only the fundamental mode is dominated. 2) Different sources are not correlated, the real part of discrete formula of CCF could be expressed as (Shiraishi, 2006). If we neglect the terms of order larger than 6, we can obtain:

$\text{Re}(\gamma_{pq}) = J_0(kr) - 2J_2(kr) \sum \lambda_l \cos 2\theta_l + 2J_4(kr) \sum \lambda_l \cos 4\theta_l$. It can be seen that there are only three unknown variables kr , $\sum \lambda_l \cos 2\theta_l$ and $\sum \lambda_l \cos 4\theta_l$. It is required of at least three sensors (3 different intervals) to solve the 3 unknown variables theoretically. The three sites need to be in a line to make the three CCFs share the same unknowns. Because of the coupling variables and non linear functions, we use the genetic algorithm and particle filter to solve out the optimum solution.

In order to confirm the validity of this new theory preliminarily, the simple wavefield composed of unidirectional plane wave is used to examine the accuracy of estimating phase velocity obtained from a linear array with 3 sensors. The distances between adjacent sensors (r and $0.5r$, $r=30\text{m}$) are set to be different so that we can have totally 3 different CCFs to solve out the optimum solution. Except for the analytical simulation, we also applied a field test to examine the availability of the new method. We have applied field test to confirm the availability of the method. Observation was conducted on 23 October 2013 at the parking lot of Zoorasia Yokohama Zoological Gardens (ZRS) in Yokohama city of Japan. We deployed 7 seismometers (KVS-300, moving speedometer) constituting two linear arrays. The two linear arrays forms an angle of 60 degree so that the SPAC method could be applied for confirmation.

In the analytical simulation, we confirmed the availability of the new method. The sensitivity of CCF with respect to phase velocity depends on the direction of linear array. When the sensitivity is low, the estimation will be bad. Hence, it is better to use at least two linear arrays forming an angle (90 degree is the best). In the field test in Yokohama, we applied both the SPAC method and the new method using 7 speedometers. Both SPAC method and the new method show good match with the theoretical dispersion curve. The new method shows narrower effective scope and shows some unstablity in both low and high frequency range. Through both simulation and field test, the availability of the new method has been confirmed. This new method makes the arrangement of sensors easier which needs only two linear arrays with a non-strict angle. In the future, we will study more about improving the inversion technique and the application of linear array.

キーワード: SPAC method, linear array, coherence complex function, particle filter
Keywords: SPAC method, linear array, coherence complex function, particle filter

小笠原硫黄島における常時微動観測に基づく地盤構造の推定 Estimation of Subsurface Structure using Microtremor Observation in Ogasawara Iwo-To Island

村越 匠^{1*}; 小森 恵津郎¹; 島田 正樹¹
MURAKOSHI, Takumi^{1*}; KOMORI, Etsuro¹; SHIMADA, Masaki¹

¹ 防衛大学校

¹ National Defense Academy

小笠原硫黄島は火山性地震や地殻変動の活発な活火山である。重力変化に関しては鶴川・他 (2011, 日本火山学会秋季大会) や鶴川・他 (2006, 測地学会誌), 地震活動に関しては渡辺・他 (2010, 日本地震学会秋季大会) や鶴川・他 (2002, 地学雑誌) など報告されている。地下構造については, 熊谷・高橋 (1985, 地学雑誌) の人工地震探査により深さ約 1 km 前後までの 3 層構造が報告されているが, 地震基盤や硫黄島全域の地下構造については明らかになっていない。そこで本研究では地表から地震基盤までの地下構造を推定するため, 小笠原硫黄島で 2013 年 10 月 18 日から 21 日にかけて常時微動観測を行った。常時微動の単点観測は, 1 地点あたり 15 分以上の観測を島内全域の 54 地点で実施した。常時微動のアレイ観測は, アレイ半径 30m, 150m, 600m の観測を 1 地点, アレイ半径 30m のみの観測を別の 1 地点で実施した。H/V スペクトル比の空間分布をみると, 硫黄島の中央部で卓越周期 1.1 秒で, 南西端のすり鉢山に向かって卓越周期が大きくなり周期 3.5 秒まで徐々に増加する傾向があることがわかった。

謝辞: 海上自衛隊硫黄島基地の皆様、特に気象班には観測点設置の際に協力して頂きました。東濃地震科学研究所の大久保慎人氏、鈴木貞臣氏には地震計の利用で協力して頂きました。記して感謝致します。

キーワード: 常時微動, 小笠原硫黄島, 地盤構造

Keywords: microtremor, Ogasawara Iwo-To Island, subsurface structure

鳥取県大山地域における微動探査および重力探査 Determination of Subsurface Structure of the Mt. Daisen area in Tottori Prefecture by Microtremor and Gravity Survey

野口 竜也^{1*}; 香川 敬生¹; 安永 晴信¹; 石郷 真大¹; 小坂 修平¹
NOGUCHI, Tatsuya^{1*}; KAGAWA, Takao¹; YASUNAGA, Harunobu¹; ISHIGO, Masaharu¹; KOASAKA, Shuhei¹

¹ 鳥取大学
¹Tottori Univ.

鳥取県の大山地域では、1983年鳥取県中部地震、2000年鳥取県西部地震、2002年鳥取中西部地震等により、被害が発生しており、この要因として地盤構造の影響が示唆される。よって、この地域で地盤構造を把握することは地震防災を考える上で重要である。地盤構造の情報に関しては、大山地域を中心に微動探査と重力探査が実施されている。本研究では、海岸部の平野を中心に新たに単点3成分観測、3地点のアレイ観測による微動探査および重力探査を実施し、既往の研究によるデータを含めて地盤構造の推定を行った。その結果、対象地域において微動データより地盤の卓越周期とS波速度構造を推定することができた。また、新規の重力データを加えた重力異常分布を得ることができた。

微動アレイ探査記録から推定される2地点間のグリーン関数 Estimation of inter-station Green's functions using microtremor array data

林田 拓己^{1*}; 吉見 雅行²
HAYASHIDA, Takumi^{1*}; YOSHIMI, Masayuki²

¹ 建築研究所 国際地震工学センター, ² 産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター
¹International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, BRI, ²Geological Survey of Japan, AIST

近年、地震波干渉法を地下構造モデルの評価ツールとして活用するための技術開発が多くの研究者によって進められている [例えば Ma et al. (2008); 山中・他 (2010); Asano et al. (2012); 林田・他 (2014)]. 地震波干渉法を常時微動記録に適用する際には、微動の振動源が2地点の周囲に等方的に存在し、微動があらゆる方位から到来しているという仮定を満たす必要があるが、現実には振動源の不均質な分布(気候条件、環境条件に伴う要因)や微動の局所的な減衰・散乱(不均質地盤構造に伴う要因)等の可能性が推察されるため、相互相関関数をグリーン関数として扱う際にはこれらの影響を十分に考慮することが必要である。

Yoshimi et al. (2012)では、新潟県南部の丘陵地帯を中心とする13地域において微動アレイ探査(SPAC法, V法)を実施している。これらの探査では半径約300m, 1000m, 3000m(小アレイ, 中アレイ, 大アレイ;それぞれ正三角形の頂点と重心からなる4点アレイ)の3種類のアレイが展開されており、測定期間は1ヶ所あたり10日以上に及んでいる。微動アレイ探査では方位角の異なる等距離の観測点ペアを展開しているため、これらのデータに対して地震波干渉法を適用することで、振動源の不均質分布が相互相関関数にもたらす影響の検討が可能となる。本研究では、微動アレイ探査記録の毎正時から1時間分の連続記録(3成分)を1単位としてデータの切り出しを行い、振幅値の正規化(Bensen et al., 2007)処理後に2地点ペア(6種類の観測点間距離:300-5200m)における微動記録の相互相関関数を導出した。

導出した相互相関関数中には、小アレイで0.4-1.0Hz前後、中アレイで0.2-0.7Hz前後、大アレイで0.1-0.6Hz前後の周波数帯域において明瞭な波群が見られた。これらの相互相関関数は方位角によらず共通の波群を有しており、位相もほぼ一致している。沿岸域近傍に展開したアレイ(海岸から500-8000mの範囲)探査記録を用いた結果においても同様の結果が得られており、10日間以上の観測データを用いることで、十分な停留位相近似が施されたと考えられる。次に、微動アレイ探査によって推定された1次元S波速度構造から理論グリーン関数を計算し、地震波干渉法によって導出した相互相関関数との比較を行った。相互相関関数と理論グリーン関数との対応は概して良好であるが、高周波数帯域ではモデルの僅かな差異が波形の再現性に大きく影響し、再現性が低下する事例も見られる。今後、微動アレイ探査による位相速度およびグリーン関数の群速度双方の再現性に留意しながらモデルの妥当性を検討し、速度構造モデルの高度化を図る予定である。

謝辞:本研究で用いたデータは、独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究「平成22年度柏崎深部地震動観測サイト周辺の広域地下構造探査—微動・自然地震動観測及びGPS観測の実施—」の一環として実施された微動アレイ探査記録で取得されたものです。

キーワード: 常時微動, 地震波干渉法, グリーン関数, 群速度, SPAC法
Keywords: microtremor, seismic interferometry, Green's function, group velocity, SPAC method

地震波干渉法及び微動解析による能登半島北西部の基盤構造の推定 Seismic basement structure estimated from seismic interferometry and microtremor analysis

小泉 亮¹; 澤田 明宏¹; 平松 良浩^{1*}; 2007 年能登半島地震 合同余震観測グループ²
KOIZUMI, Ryo¹; SAWADA, Akihiro¹; HIRAMATSU, Yoshihiro^{1*}; THE GROUP, Aftershock observation²

¹ 金沢大学, ²2007 年能登半島地震合同余震観測グループ
¹Kanazawa University, ²the group for the joint aftershock observations

1. はじめに

近年、地下構造探査の中で地震波形記録の自己相関解析(あるいは相互相関解析)から地下構造のレスポンスを評価する地震波干渉法が注目されている。本研究では、能登半島北西部を対象に、地震波干渉法及び微動解析を用いて基盤構造の推定を行った。また、この地域における重力異常解析や反射法地震探査(佐藤・他,2007)の結果と比較を行うことで、地震波干渉法及び微動解析の有効性について検討し、能登半島の地塊構造について議論する。

2. データ及び解析手法

(1) 地震波干渉法

2007 年能登半島地震合同余震観測グループ(酒井・他, 2007)による観測点の内、44 地点で観測された 2007 年能登半島地震の余震データから観測点に対する入射角が 35 度以内であり、S 波の検測がなされているものを利用した。変位波形の SH 成分に 2 Hz のハイパスフィルターを適用し、S 波到達時から 10 秒間を解析区間として自己相関関数(ACF)を計算した。各観測点において得られた ACF を重合処理し、その観測点における ACF とした。

(2) 微動解析

地震波干渉法の解析を行った 44 の観測点の設置地点において微動観測を行い、得られた微動データの H/V スペクトル比を求めた。二層構造を仮定し、H/V スペクトルと理論 H/V スペクトル比のピーク周波数が一致するよう、基盤構造を推定した。

3. 結果・まとめ

地震波干渉法による深度推定において、ACF の卓越したピークが確認される観測点はそのピーク時間より基盤深度を求め、卓越したピークが複数存在する観測点は重力異常解析より得られた基盤構造を参考にして基盤深度を求めた。なお、地震波速度は佐藤・他(2007)の P 波速度 3.2km/s を使用し、地震調査研究推進本部 2012 が提案する全国一次地下構造モデルより P 波速度 3.2km/s に対応する値として S 波速度 1.7km/s を使用した。

反射法地震探査(佐藤他,2007)による基盤深度が 100 m 以下の浅い地域では、反射法地震探査による結果と地震波干渉法による結果は一致しなかった。また ACF のみで深度を推定できた観測点は 44 地点中 10 地点であった。一方、微動解析では 44 地点中 35 地点で深度推定が可能であった。したがって、地震波干渉法は能登半島北西部において基盤深度の推定を行う上では有効的な手法ではないと考えられる。

深度推定が可能であった観測点では、地震波干渉法、微動解析、重力異常解析より得られた結果は概ね一致しており、桑塚地塊は猿山地塊よりも基盤深度が浅いことが示された。2007 年能登半島地震では桑塚地塊での隆起が観測されており、2007 年能登半島地震の震源断層のような海域の活断層の活動によって桑塚地塊が継続的に隆起して基盤深度が浅くなったという考え(Hiramatsu et al., 2008)と本研究結果は整合的である。

謝辞:本研究では 2007 年能登半島地震合同余震観測グループによる地震波形記録を使用しました。また微動解析では防災科学技術研究所から微動計を借用し、防災科学技術研究所の先名重樹博士には微動解析についてご指導いただきました。記して感謝いたします。

キーワード: 自己相関関数, H/V スペクトル, 重力異常, 地塊構造, 能登半島

Keywords: auto correlation function, H/V spectrum, gravity anomaly, geological block structure, the Noto Peninsula

3次元不均質媒体における非等方震源分布による波動場の地震波干渉法によるグリーン関数合成に関する検討 Retrieval of Green's function in a 3D inhomogeneous medium with nonisotropic source distribution using interferometry

地元 孝輔^{1*}; 山中 浩明¹
CHIMOTO, Kosuke^{1*}; YAMANAKA, Hiroaki¹

¹ 東工大総理工
¹Tokyo Tech.

弾性均質媒体における等方震源分布では、地震波干渉法によってグリーン関数を合成できると考えられるため (e.g., Wapenaar and Fokkema, 2006)、長期微動記録を用いた地震波干渉法によって速度構造の推定が行われている (e.g., Shapiro and Campillo, 2004)。しかし、現実の微動場は非弾性不均質速度構造における非等方震源分布と考えられ、理論的な適用性についても検討されているように、現実の地震波干渉法によるグリーン関数合成においては十分に妥当性が検討されなければならない。

本研究では、関東平野を対象として、3次元不均質構造における非等方震源の地震波干渉法の適用性について数値実験により検証する。地震波干渉法の数値実験は3次元差分法によって行い、リッカーウェーブレット型の複数地表震源に対する2点の地表応答の相互相関を計算する。3次元不均質構造は山中・山田(2006)による堆積層モデルを用いた。また、非等方震源は、海域にのみ震源を置くこととした。これらによる結果は、それぞれ均質構造および等方震源による結果と比較することでそれぞれの影響を調べた。

まず、均質媒体における等方震源の場合、相互相関関数は直接計算されたグリーン関数と完全には一致しないものの、表面波成分はよく合成され、表面波群速度は理論値と一致する。若干の不一致は、地震波干渉法理論においてグリーン関数を合成する際の近似に由来するものと考えられる (e.g., Kimmman and Trampert, 2010)。また、相互相関関数は正と負の遅れ時間に関して完全に対称となった。つぎに、均質媒体における非等方震源の場合、相互相関関数は顕著に非対称となり、正の遅れ時間の相互相関関数には顕著な表面波成分は確認できなかったものの、負の遅れ時間の相互相関関数は等方震源の場合とほぼ一致し、それによる表面波群速度に関しても理論値と調和的であった。これらのことは、これまでの地震波干渉法の研究で震源分布がグリーン関数合成の成否に影響することが指摘されているとおりである (e.g., Tsai, 2010)。

関東平野の堆積層モデルを用いた3次元不均質媒体においては、等方震源の場合でも相互相関関数は非対称となった。すなわち、3次元不均質媒体においては等方震源分布であっても、震源からの波動伝播が複雑になり、みかけの震源分布が非等方になったためと考えられる。特に、負の遅れ時間の相互相関関数が正のそれよりも大きくなっていることから、東側の震源がみかけ上大きくなったものと考えられる。関東地域のモデルは、西側に関東山地が位置し、東側が太平洋となり堆積層が厚くなることを考慮すると、厚い堆積層によって東側の震源による表面波の励起が大きくなったことが、みかけの震源分布を非等方にしたためであると考えられる。この非対称のため、相互相関関数はグリーン関数とあまり一致しない。表面波群速度についても、相互相関関数の正負の遅れ時間によるもので若干異なるものの、それぞれグリーン関数による表面波群速度と大きくは異なる結果となった。最後に、3次元不均質媒体において非等方震源とした場合についても、同様に相互相関関数は正負非対称となり、グリーン関数との一致もよくない。しかし、表面波群速度に関してはおおむね一致した。

これらの結果により、地震波干渉法によるグリーン関数の合成に関しては、震源の等方性が大きく影響することがわかる。また、不均質構造は震源のみかけの等方性に寄与するため、グリーン関数合成に関してそれと同様の問題となる。すなわち現実問題においては震源の等方性(不均質構造による影響も含めて)がどれくらい満たされているか重要となるが、それを知ることは容易ではなく、今後も現実の適用事例から検討する必要があるといえる。ただし、地震波干渉法の多くの適用事例では表面波群速度から速度構造モデルの推定を行っているように、本研究においても表面波群速度に関してはグリーン関数のそれとおおよそ良い一致をみせるので、現実の適用事例においても妥当である可能性が大きいと考えられる。

キーワード: 地震波干渉法, グリーン関数, 不均質構造, 等方震源, 3次元差分法

Keywords: Seismic interferometry, Green's function, inhomogeneous, isotropic source, 3D FDM

高密度常時微動観測から推定される高知平野の表層地盤構造 Estimation of subsurface structure by high density microtremor observations in Kochi Plain

大石 佑輔^{1*}; 久保 篤規²; 高橋 宏和³; 山品 匡史²
OISHI, Yusuke^{1*}; KUBO, Atsuki²; TAKAHASHI, Hirokazu³; YAMASHINA, Tadashi²

¹ 高知大学大学院総合人間自然科学研究科, ² 高知大学理学部附属高知地震観測所, ³ 高知大学理学部
¹Studies in Science, Graduate School of Integrated Arts and Sciences, Kochi University, ²Kochi Earthquake Observatory, Faculty of Science, Kochi University, ³Faculty of Science, Kochi University

高知平野は南海地震の震源域近傍に位置し、南海地震発生時には強震動や津波による複合災害が危惧されており、減災に向けた強震動予測を行うことは重要である。強震動予測の為に、「震源特性」、「伝播経路特性」、「サイト増幅特性」の3つの特性を評価する必要がある。これらのうちサイト増幅特性の把握が近年盛んに行われている。サイト増幅特性の評価に必要な地盤モデルは、ボーリングなどの既存地盤資料によって進められているが、本研究では、コストの低さや測定方法の簡便さの観点から、常時微動（以下、微動：地表の微小な揺れの総称）の観測を行い、得られる水平動と上下動のスペクトル比（H/V スペクトル比）を用いた高密度のサイト増幅特性の評価や地盤モデルの作成を行うことを目的とする。

本研究では「狭義の高知平野」と隣接する「香長平野」「高岡・弘岡低地」において1272点の単点微動観測を行い、そのうち1254点におけるH/V スペクトル比を求めた。狭義の高知平野では約200m間隔で、香長平野と高岡・弘岡低地では500~1000m間隔で1点当り11分から15分以上の微動3成分観測を行った。H/V スペクトル比の解析には、TremorDataView [先名・藤原(2008)] を使用し、スペクトル比のピーク数とピークごとの周期・振幅を読み取った。H/V スペクトル比の卓越周期は表層地盤の厚さを、また振幅は地盤増幅率を反映した物理量であることが示されている [例えば中村(2008)]。

高知平野におけるH/V スペクトル比の卓越周期（図参照）は、浦戸湾北部周辺で長くなる傾向があり、最大で1.6秒である。その他の地域では0.1~0.8秒程度である。スペクトル比の最大値には地域的な特徴はみられず、局所的に振幅が非常に大きい地域が数か所存在する。卓越周期とスペクトル比の最大値の分布は、過去の南海地震の被害報告 [都司(2012); 間城(2011); 三神・辻野(2012); 山品ら(2013)] とよく対応しており、被害が大きかった地域は微動の卓越周期が長く堆積層の厚いと考えられる地域や、スペクトル比の最大値の大きい、すなわち地盤増幅率の大きいと考えられる地域とよく対応している。中村(2008)の提唱する地盤に対する壊れやすさの指数Kg値 (=最大値²/卓越周波数) の分布を見ると、過去の被害分布とよく一致しているため、高知平野に点在するKg値の高い地点は過去の被害報告がなくとも周辺よりも大きな被害を受けると予測される。また、浦戸湾周辺ではH/V スペクトル比に2つのピークが表れるという特徴がある。狭義の高知平野西部と香長平野では、2つのピークを示す観測点は少ない。

得られたH/V スペクトル比の卓越周期および第2ピーク周期情報と大堀(2013)の地盤モデルとを比較検討したところ、卓越周期は基盤深度と、第2ピーク周期は沖積層基底深度と一次の線形関係があることが分かった。求めた実験式より推定した地盤構造は、概ね深度80mまでは良い一致を示す。ただし、一部の地域では差が明瞭であり、深度80m以深の深い構造では一致の度合いが悪い。これは、大堀(2013)の地盤モデル作成に使用されているボーリング数が不十分であるからと考えられる。また、4分の1波長則（層厚=周期× $V_S/4$ ）を用いて第2ピーク周期と地盤モデルの沖積層基底深度から沖積層のS波伝播速度 V_S を求めると、浦戸湾北部周辺を含む狭義の高知平野東部では158m/s程度となり、これは周辺（ $V_S=200$ m/s程度）よりも小さい結果であり、沖積層と洪積層（ $V_S=300$ m/s程度）のコントラストが大きいことが分かる。H/V スペクトル比の第2ピークを示す観測点が少ない狭義の高知平野西部や香長平野では、沖積層と洪積層の V_S コントラストが大きくないものと推定できる。

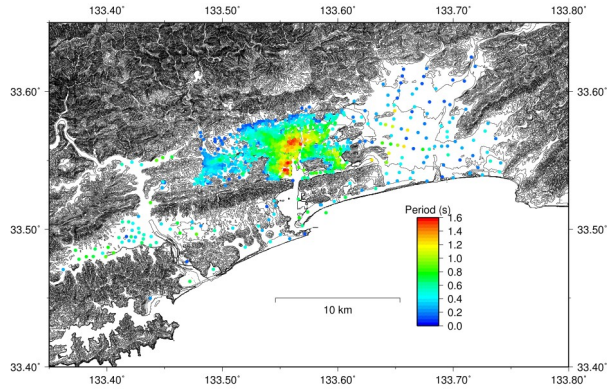
本研究では、高知平野における強震動予測に必要な地盤特性と地盤構造を、単点微動観測により推定できた。より精度良く各層の V_S を求めるには、層厚と V_S の双方を同時に拘束できるアレイ観測などが求められる。また、狭義の高知平野で求めた線形関係が他の地域で利用できるかについては、地盤構造が異なるとその地域特有の新たな関係が存在する可能性があり、既に地盤構造が明らかな複数箇所で単点微動観測を行い、その関係を検討する必要がある。

キーワード: 常時微動, H/V スペクトル比, 表層地盤, 高知平野
Keywords: microtremor, H/V spectral ratio, subsurface structure, Kochi Plain

SSS35-P10

会場:3 階ポスター会場

時間:5 月 2 日 16:15-17:30



液状化地域の現世地質学的解釈：浦安地域におけるケーススタディ（1） Recent Geological Interpretation of A Liquefied Area: A Case Study in Urayasu City, Japan (1)

岩本 広志^{1*}; 東 将士²; 樋口 茂生³; 稲田 晃³; 伊藤 彰秀⁴; 上加世田 聡⁵; 川崎 健一⁶; 楠 恵子⁷; 佐藤 伸司⁸; 品田 正一²; 末永 和幸⁹; 渡邊 拓美³

IWAMOTO, Hiroshi^{1*}; HIGASHI, Masashi²; HIGUCHI, Shigeo³; INADA, Akira³; ITO, Akihide⁴; KAMIKASEDA, Satoshi⁵; KAWASAKI, Kenichi⁶; KUSUNOKI, Keiko⁷; SATO, Shinji⁸; SHINADA, Shoichi²; SUENAGA, Kazuyuki⁹; WATANABE, Takumi³

¹ 関東天然瓦斯開発, ² 石油資源開発, ³ 無, ⁴ 千葉北高校, ⁵ NTC コンサルタンツ (株), ⁶ 千葉西高校, ⁷ 浦安高校, ⁸ 千城台高校, ⁹ (株) 地球システム科学

¹ Kanto Natural Gas Development Co., Ltd, ² JAPEX, ³ No affiliation, ⁴ Chiba-kita High School, ⁵ NTC Consultants Co., Ltd., ⁶ Chiba-nishi High School, ⁷ Urayasu High School, ⁸ Chishirodai High School, ⁹ Earth System Science Co., Ltd.

2011.3.11 東北地方太平洋沖地震で著者のひとりが勤務する浦安高校において、大量の噴砂、噴水をともなう長大地割れが発生した(楠ほか, 2011)。本研究の目的は、この生成メカニズムおよび原因究明にある。地下地質調査にはハンドオーガーおよび動的コーン貫入試験を用い、埋立層の層序を明らかにした他、空中写真解析をおこなった。その結果、次のことが明らかになった。

調査地域は浦安高校敷地内で、旧海岸線から数 100m 海寄りに位置する埋立地である。沖積層頂部までの深さは 3-4m である。校庭には 2 本の地割れが、①地割れ：北北東-南南西方向、および、②地割れ：西北西-東南東方向に分布する。地割れの直下には、地震後の改修工事で埋立時のものとみられる杭列が見つかった。この杭列は周辺の砂、シルト埋立層に包埋されていて、地震動に対する受動特性の違いから地表部に開いた地割れを生じたものと考えられる。一方、地割れを挟んだ埋立層の層相の違いは顕著で、①地割れに直交する断面：沖積層頂部からその上約 2m ほどの埋立層の層相が、西側では砂質で Nd 値も比較的高いのに対し、東側ではシルト質で Nd 値は 0 に近い。②地割れに直交する断面：北東側(猫実川側)では非常に Nd 値が大きいのに対し、南西側では比較的小さい、と対照的な特徴を示す。

次に、空中写真解析の結果、①地割れおよび②地割れともに埋立過程における工事(工期、工区)の不連続の場所に当たることが判明した。埋立地は、①②2本の地割れを挟んで次の3地区に区分され、《A》地区：海面下土地(浦安市史編さん委員会, 1985)、《B》地区：海底浚渫土砂による埋立地《C》地区：護岸周辺地帯である。なお、《A》は文字通り海面下にありながら土地所有者が存在した地区。また《B》とは埋立工程や盛土など埋立層の構成も異なっていた。《B》はこの時期の埋立の圧倒的な部分を占め、海底浚渫土による埋立を行った典型的な埋立地である。《C》は海底浚渫土による埋立を行っておらず、《B》に遅れて護岸的な性格をもった堅固な埋立地帯として生成された。ちなみに、①地割れは《A》と《B》の境界に、②地割れは《B》と《C》の境界に位置し、沖積地(旧海岸線の陸側)を含めると4地区に分けられる。

以上のことから、埋立プロセスの不連続が、地割れの発生要因になっていると考えられる。液状化地域の問題解決にあたっては、沖積層および埋立層の生成、埋立プロセスの把握が大切であり、これが防災上重要であることを強調したい。

文献

楠 恵子, 東 将士, 樋口 茂生, 稲田 晃, 伊藤 彰秀, 岩本 広志, 上加世田 聡, 川崎 健一, 末永 和幸 (2011) 2011 年東北地方太平洋沖地震による人工地盤の変状-1970 年前後の千葉県浦安市埋立地における液状化現象-. 地学団体研究会青森総会.

浦安市史編さん委員会 (1985) 浦安市史. 浦安市, 64-66.

キーワード: 液状化, 地割れ, 動的コーン貫入試験, 浦安, 埋立地

Keywords: liquefaction, crack, dynamic cone penetration test, Urayasu, reclaimed land